

基于 72 通泵浦的克尔透镜锁模 Yb:YAG 薄片激光器

雷希音^{1,2}, 刘锐¹, 李辉³, 李想¹, 戴隆辉^{1,2}, 公发全¹, 邓沁文¹, 吕起鹏¹, 贾勇¹, 孙天祥¹, 王锋¹, 李刚^{1*}¹中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001

摘要 基于自主研制的 72 通薄片泵浦模块进行了克尔透镜锁模薄片激光技术研究。首先,分析了薄片克尔透镜锁模原理。然后,基于 ABCD 矩阵和孤子锁模理论设计了谐振腔。最后,基于 72 通泵浦模块进行了克尔透镜锁模谐振腔飞秒脉冲实验研究,当泵浦功率为 72 W 时,获得了平均功率为 11.78 W、脉冲宽度为 243 fs、重复频率为 81.45 MHz 的飞秒脉冲输出;优化腔型后,在 94 W 泵浦时得到了 22.33 W 的输出功率,脉冲宽度为 394 fs。

关键词 激光器; 薄片激光器; 多通泵浦; 克尔透镜锁模; 飞秒激光

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221168

1 引言

高功率飞秒激光由于具有极窄的脉冲宽度、极高的峰值功率和优异的光束质量,在太赫兹产生、光学频率梳和高次谐波等科研领域^[1-3]中有着极为重要的应用价值。飞秒脉冲激光器在工业、医疗领域中也得到了广泛的应用^[4-6]。传统的增益介质为块状结构的飞秒脉冲激光器由于受到高功率下的热透镜效应的限制,能够输出的平均功率难以突破 20 W 量级^[7]。采用具有较大长径比的增益介质的光纤激光器虽然减小了热透镜效应的影响,但高功率带来的受激布里渊散射等非线性效应仍然会导致功率放大受限^[8-9]。

薄片激光器的出现^[10-11]使得飞秒激光器的功率放大能够突破这些限制。薄片激光器利用多通泵浦结构,将泵浦光多次反射至厚度为百微米量级的片状增益介质上,可实现高效率的泵浦吸收。极薄的增益介质结合背向冷却技术,大大减小了热透镜效应与非线性效应。目前,基于薄片增益介质的高功率飞秒脉冲激光器主要采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模和克尔透镜锁模(KLM)技术。2000年,Aus der Au等^[12]利用 SESAM 锁模的薄片激光器首次实现了平均功率为 16 W、脉冲宽度为 730 fs、重复频率为 34.6 MHz 的飞秒脉冲输出。2019年,Saltarelli等^[13]利用具有高损伤阈值的 SESAM 和腔内多程反射结构,实现了平均功率为 350 W、脉冲宽度为 940 fs、重复频率为 8.88 MHz 的飞秒脉冲输出。这也是目前功率最高的基于薄片增益介质的飞秒激光振荡器。关于克尔透

镜锁模的 Yb:YAG 薄片激光器,2011年由 Pronin 等^[14]首次研制成功,实现了平均功率为 45 W、脉冲宽度为 270 fs、重复频率为 40 MHz 的飞秒脉冲输出。目前,最高输出功率是由 Brons 等^[15]于 2014 年实现的 270 W,对应的脉冲宽度为 330 fs,重复频率为 18.8 MHz。2021年,Fischer 等^[16]利用强的自相位调制效应,得到了平均功率为 103 W、脉冲宽度为 52 fs、重复频率为 17.1 MHz 的飞秒脉冲输出,这是脉宽在百飞秒以下时平均功率最高的输出结果,也是目前飞秒激光振荡器获得的最高峰值功率。可见薄片激光振荡器有望成为高场科学和非线性光学研究中有竞争力的光源。

虽然目前 KLM 实现的功率比 SESAM 锁模的结果更低,但 KLM 的 Yb:YAG 薄片激光器的脉冲宽度仅为 SESAM 锁模的薄片激光器的 1/4,腔内也没有 SESAM 这一制造成本高昂且易于损坏的器件。更重要的是,目前输出功率最高的 KLM 薄片激光器的腔内峰值功率达到 180 MW,其可在空气中工作,但高功率的 SESAM 锁模激光器必须在真空环境中工作。所以,从腔内峰值功率、制造成本、功率可放大性以及工作稳定性的角度来看,KLM 的 Yb:YAG 薄片激光器比 SESAM 锁模的薄片激光器更具优势。

目前,基于国内平台的 KLM 薄片激光器研究由于受限于薄片多通泵浦模块这一核心器件,因此研究结果较少。Peng 等^[17]于 2016 年发表了平均功率为 15 W、脉宽为 272 fs、重复频率为 86.7 MHz 的研究结果,其使用的多通泵浦模块为德国 D+G 公司的 24 通商业产品。本文基于中国科学院大连化学物理研究所

收稿日期: 2022-08-24; 修回日期: 2022-09-19; 录用日期: 2022-10-21; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 大连市科技创新基金 (2018J11CY013)

通信作者: *lig@dicp.ac.cn

化学激光先进精密光学技术研究组自主研制的 72 通泵浦模块,通过 ABCD 矩阵的迭代计算,设计并搭建了克尔透镜锁模谐振腔,在 72 W 的泵浦功率下,获得了平均功率为 11.78 W、脉冲宽度为 245 fs、重复频率为 81.45 MHz 的飞秒脉冲输出。随后通过增大聚焦凹面镜对的曲率半径(RoC),在 100 W 的泵浦功率下得到了平均功率为 22.33 W、脉冲宽度为 393 fs、重复频率为 79.36 MHz 的输出结果。实验结果初步验证了模块的稳定性和功率可放大性,为后续进一步实现百瓦级 KLM 提供了可能。

2 薄片克尔透镜锁模激光器的锁模理论分析

自 1991 年首次观察到克尔透镜锁模现象^[18]以来, KLM 飞秒激光器的输出功率已由百毫瓦量级提升到百瓦量级。但随着功率的放大,克尔透镜锁模,尤其是基于薄片增益介质的克尔透镜锁模的基本原理并未发生本质变化。

光通过克尔介质时,折射率(n)与光强(I)呈如下关系:

$$n(I) = n_0 + n_2 \cdot I, \quad (1)$$

式中: n_0 和 n_2 分别为克尔介质的线性折射率和非线性折射系数。由于腔内激光强度分布为高斯型,中心光强折射率大于边缘,折射率也大于边缘,因此高斯光

束在克尔介质中传播时将发生会聚,产生类似透镜的自聚焦效应。其焦距(f_{KM})与峰值功率有关:

$$f_{\text{KM}} = \frac{\pi \omega_f^4}{4n_2 P_{\text{peak}} d_{\text{KM}}}, \quad (2)$$

式中: ω_f 为聚焦处的模式半径; P_{peak} 为腔内峰值功率; d_{KM} 为克尔介质的厚度。

这一效应的存在将导致锁模运转时的腔内模式与连续波运转时的腔内模式存在差异。在锁模运转下,利用这种差异减小硬光阑处的腔内模式半径,使锁模运转的损耗显著小于连续波运转,即可实现锁模。因此,克尔透镜锁模谐振腔设计的关键在于对锁模运转和连续波运转的腔内模式进行模拟,确保锁模运转时硬光阑处的模式半径显著减小。

为了确保克尔效应的强度,克尔透镜锁模谐振腔均使用一对聚焦凹面镜,将克尔介质置于束腰聚焦处,并使谐振腔处于介稳态。图 1 为典型薄片克尔透镜锁模谐振腔示意图,在谐振腔中使用了一对 RoC 相等的聚焦镜,输出耦合器(OC)至聚焦镜 1(FM1)、FM1 至聚焦镜 2(FM2)、FM2 至薄片晶体、薄片晶体至高反射镜(HR)的距离分别记为 L_1 、 L_f 、 l' 、 l'' , FM1 和 FM2 的焦距均为 f ,将 $l' + l''$ 记为 L_2 ($L_2 > L_1$)。如图 2 所示,此谐振腔稳定性随聚焦臂长度的变化有 4 个临界点,对应的聚焦臂长的临界值分别用 $l_1 \sim l_4$ 表示。

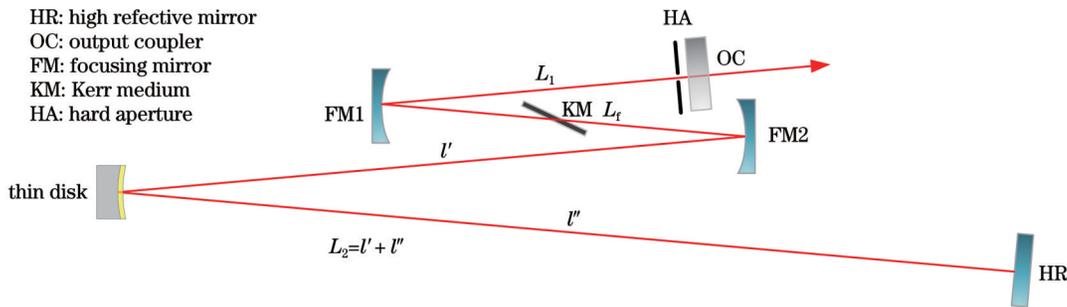


图 1 典型的薄片克尔透镜锁模谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic of typical cavity of KLM thin disk laser resonator

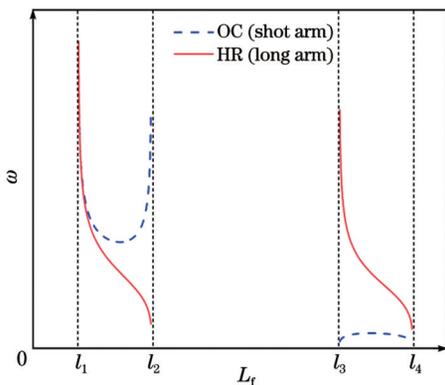


图 2 连续光输出时端镜上的腔内模式半径 ω 随聚焦臂长度 L_f 的变化

Fig. 2 Intracavity mode radius ω on end mirror versus L_f during continuous optical output

在 4 个临界值中,只有 l_2 满足硬光阑启动克尔透镜锁模的条件且 OC 处的输出是准直的。

当 L_f 稍小于 l_2 时,谐振腔内 OC 处的模式半径随 f_{KM} 的变化如图 3 所示。当 f_{KM} 为无穷大即连续波运转时 OC 处的模式半径为 ω_{CW} 。 f_{KM} 越小,OC 处模式半径的减小就越显著,当硬光阑处的模式半径减小达到 8% 时,克尔透镜的等效焦距定义为 f_{min} ,对应的 OC 处的模式半径为 ω_{thold} 。

由于 n_2 和 d_{KM} 为确定的物理量, P_{peak} 可由预计输出的功率、脉宽和谐振腔的输出耦合率计算得到,而 ω_f 可由 ABCD 矩阵方法计算得到,因此 f_{KM} 与 ω_f 是耦合的。从连续波运转的谐振腔出发,计算初次迭代的克尔介质处的模式半径(ω_{in})以及对应的等效焦距(f_{KM1}):

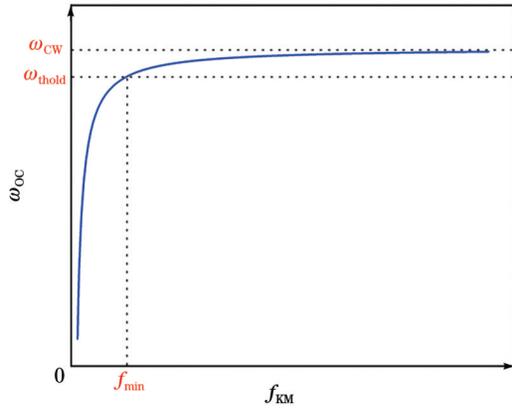


图 3 当 L_f 稍小于 l_2 时谐振腔在 OC 处的模式半径随 f_{KM} 的变化
Fig. 3 Mode radius of resonator at OC versus f_{KM} when L_f is slightly smaller than l_2

$$f_{KM1} = \frac{\pi \omega_{f1}^4}{4n_2 P_{peak} d_{KM}} \quad (3)$$

利用 f_{KM1} 对应的 ABCD 矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1/f_{KM1} \end{pmatrix}$, 基于谐振腔的 ABCD 矩阵计算得到第二次迭代的克尔介质处的模式半径 (ω_{f2}) 以及对应的等效焦距 (f_{KM2}):

$$f_{KM2} = \frac{\pi \omega_{f2}^4}{4n_2 P_{peak} d_{KM}} \quad (4)$$

通过多次迭代, 最终收敛时可得到克尔透镜锁模运转时的 ω_f 、 f_{KM} 以及整个谐振腔的模式分布。

关于腔内群延迟色散 (GDD) 的补偿量 D , 由孤子

锁模的脉宽公式^[19]确定:

$$\tau_p = 1.76 \frac{2|D|}{\gamma_{SPM} E_p} \quad (5)$$

式中: τ_p 为输出脉冲的宽度; E_p 为腔内单脉冲能量; γ_{SPM} 为谐振腔的自相位调制系数。自相位调制系数包括增益介质、空气和克尔介质三部分, 对于百瓦以下的克尔透镜锁模的薄片激光器而言, 克尔介质的自相位调制系数 (γ_{KM}) 比增益介质和空气大 2 个数量级, 因此只需考虑克尔介质的贡献。其表达式为

$$\gamma_{KM} = \frac{8n_2}{\lambda} \cdot \frac{d_{KM}}{\omega_f^2} \quad (6)$$

式中: λ 为输出激光的中心波长。与计算 ω_f 所需的物理量相同, 利用预计输出的功率、脉宽和谐振腔的输出耦合率可计算出所需的色散补偿量 D 。

3 实验装置

72 通泵浦模块的光学结构图和实物图分别如图 4(a)、(b) 所示^[20], 该模块利用多对棱镜组和抛物面镜使泵浦光在薄片晶体表面上多次反射, 实现百微米厚的 Yb:YAG 晶体对泵浦光的高效吸收。实验中使用的晶体厚度为 200 μm , 直径为 15 mm, 掺杂物 Yb 的原子数分数为 7%, 表面曲率半径为 3.6 m, 背向与金刚石热沉焊接并采用射流冷却^[21]。该晶体在 72 通泵浦情况下, 对泵浦光的吸收率超过 99%^[22]。

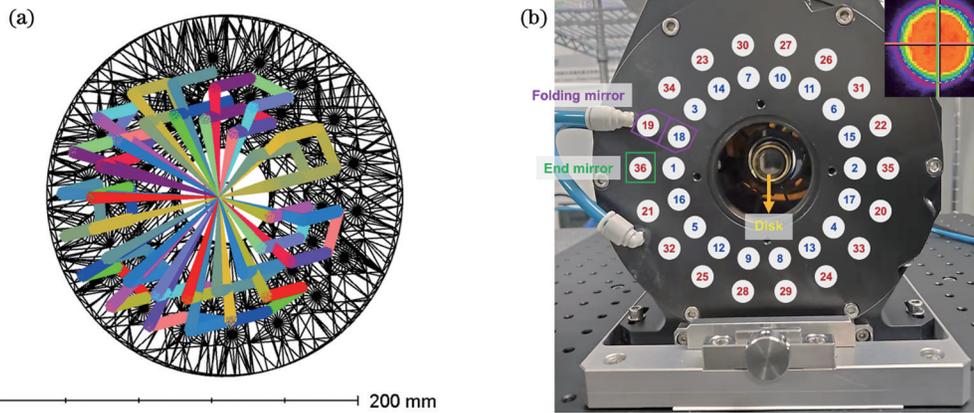


图 4 72 通泵浦模块的光学结构图和实物图^[20]。(a) 光学结构图; (b) 实物图

Fig. 4 Optical structure diagram and physical diagram of 72-pass pump module^[20]. (a) Optical structure diagram; (b) physical diagram

图 5 所示为输出功率为 11.78 W 时所设计的谐振腔示意图, 实验使用的泵浦源为光纤耦合输出的波长为 940 nm 的半导体激光器, 纤芯直径为 400 μm 。薄片晶体上泵浦光斑直径为 2 mm, 平顶泵浦光斑的照片如图 4(b) 右上角所示。当泵浦功率达到 72 W 时, 锁模输出功率最大, 此时薄片晶体内的功率密度约为 2.29 kW/cm^2 。谐振腔内的反射镜除聚焦镜 FM1 和 FM2 是 RoC 为 150 mm 的凹面镜外, 其余均为平面镜, OC 的输出耦合率为 8%, 色散镜 HD1 和 HD2 的 GDD

分别为 -3000 fs^2 和 -1000 fs^2 , OC 处的硬光阑孔径为 2.3 mm, 聚焦处的克尔介质厚度为 2 mm。

当输出功率为 12 W、脉冲宽度为 250 fs 时, 腔内峰值功率为 7.4 MW。利用式 (3)、(4) 计算得到 $f_{KM} = 38 \text{ mm}$, 硬光阑处锁模后的模式直径将由 2.23 mm 减小到 2.07 mm。克尔介质上的模式直径为 23.7 μm 。锁模前、后腔内模式半径的对比情况如图 6 所示。

随后为了获得更高的输出功率, 将聚焦镜 FM1 和 FM2 更换为 RoC 为 200 mm 的凹面镜, 进行谐振腔设

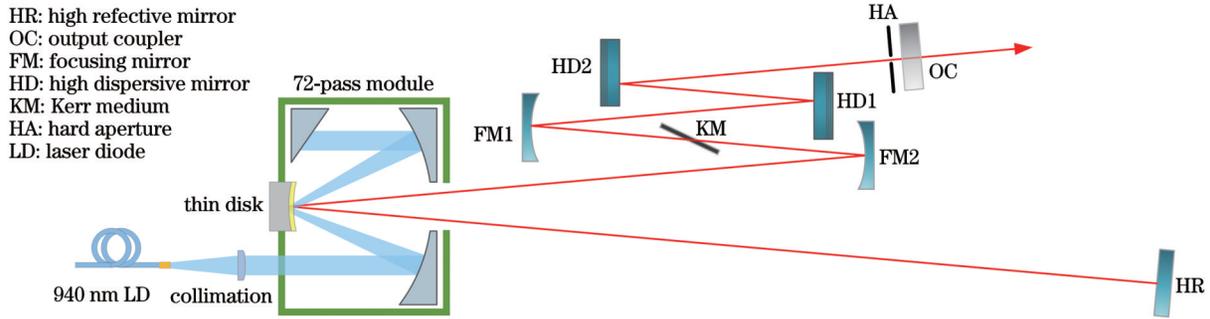


图5 实验使用的克尔透镜锁模 Yb:YAG 薄片激光器谐振腔示意图

Fig. 5 Schematic of KLM Yb:YAG thin disk laser cavity used in experiment

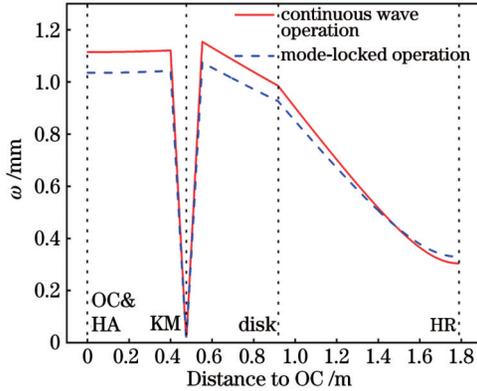


图6 聚焦镜曲率半径为 150 mm 的谐振腔在连续波运转和锁模运转时的腔内模式半径对比图

Fig. 6 Comparison of mode radius of cavity with 150 mm RoC focusing mirror during continuous wave operation and mode-locked operation

计,同时对克尔介质厚度和二阶色散量进行微调,得到的腔形结构仍然如图 5 所示。HD1 和 HD2 的 GDD 均为 -3000 fs^2 ,硬光阑口径为 2.5 mm,克尔介质厚度为 3 mm,薄片晶体上的泵浦光斑半径等其他参数保持不变。

4 实验结果与讨论

当 FM1 和 FM2 的 RoC 为 150 mm (后文简记为 R150) 时,图 5 所示的 Yb:YAG 薄片激光器在连续波运转下的输出情况如图 7 所示。当连续泵浦的功率 (P_{pump}) 达到最大值 150 W 时,薄片晶体表面的功率泵浦密度为 4.78 kW/cm^2 ,输出功率 (P_{out}) 为 67.7 W,光光效率达到 45.1%。

在腔内插入孔径为 2.3 mm 的硬光阑后,当泵浦功率设置为 72 W 时,连续输出功率为 7.81 W。此时,通过施加扰动可以将连续输出转为稳定的飞秒脉冲输出,输出功率为 11.78 W。利用示波器和高速光电探头测得的脉冲序列波形如图 8 所示,脉冲的重复频率为 81.45 MHz,对应的单脉冲能量为 $0.15 \mu\text{J}$ 。图 8(b) 中的脉冲序列的峰值强度波动小于 0.5%。

使用商用自相关仪测定的自相关曲线如图 9 所示,双曲正割拟合得到的脉冲宽度为 243 fs。图 9 右上

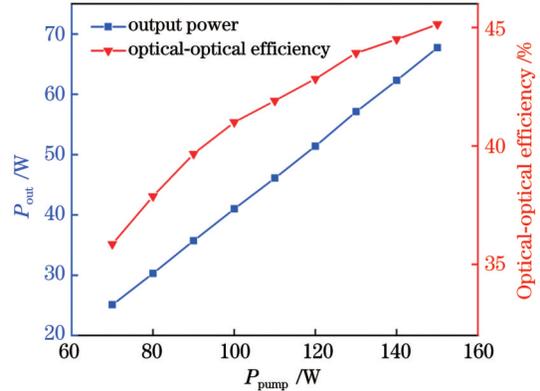
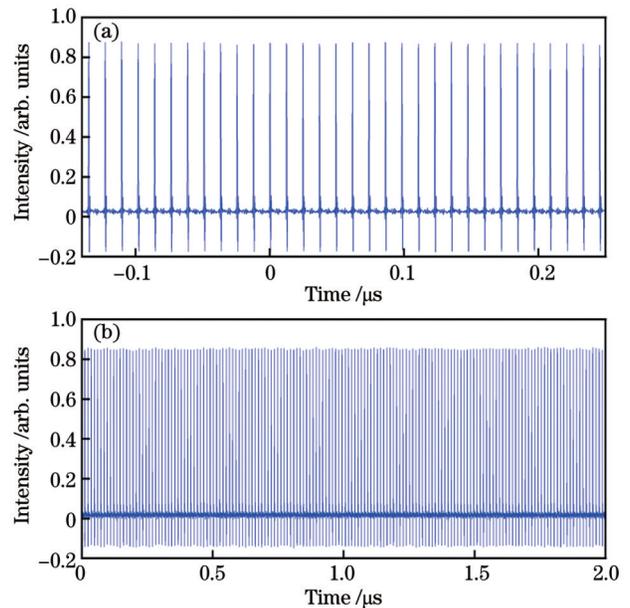


图7 Yb:YAG 薄片激光器(R150)连续波运转时的输出功率和光光效率随泵浦功率的变化

Fig. 7 Output power and optical-optical efficiency of Yb:YAG thin disk laser (R150) during continuous wave operation versus pump power

图8 不同示波器采样时间下 Yb:YAG 薄片激光器(R150)锁模输出的飞秒脉冲序列。(a) 0.25 μs ; (b) 2.0 μs Fig. 8 Mode-locked output femtosecond pulse train of Yb:YAG thin disk laser (R150) at different oscilloscope sampling time. (a) 0.25 μs ; (b) 2.0 μs

角附图为电荷耦合元件(CCD)相机拍摄的输出光斑模式的照片。在自相关仪测量极限范围(150 ps)内未

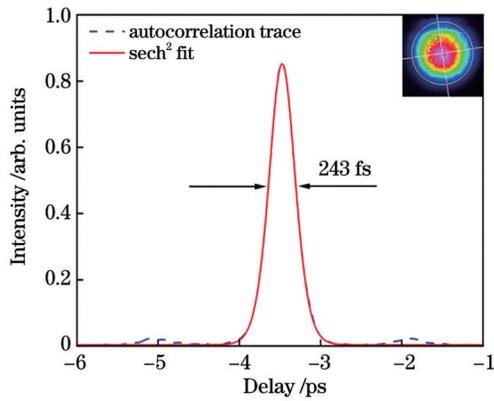


图9 Yb:YAG薄片激光器(R150)锁模输出的飞秒脉冲的强度自相关曲线和双曲正割拟合结果

Fig. 9 Intensity autocorrelation curve and sech^2 fitting result of mode-locked output femtosecond pulse of Yb:YAG thin disk laser (R150)

观测到多脉冲现象,可以确认激光器是单脉冲输出。在自相关曲线中,峰两侧有微小突起,这一现象是腔内反射镜和晶体的三阶色散未得到补偿造成的。图10显示的是光谱分析仪测得的脉冲输出光谱。实验中使用的色散镜在光谱范围(1025~1035 nm)内的色散曲线不平坦,受此影响,图10显示的光谱具有多个相连的峰,故采用高斯型包络估算其半峰全宽,得到的光谱宽度约为4.6 nm,其时间带宽积为0.317,略大于双曲正割型脉冲的理论最小值(0.315)。

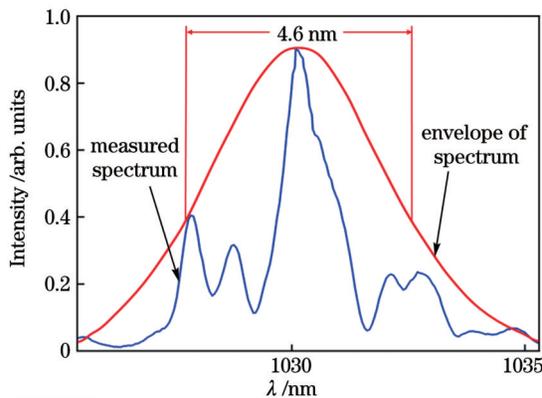


图10 Yb:YAG薄片激光器(R150)锁模输出的光谱

Fig. 10 Mode-locked output spectrum of Yb:YAG thin disk laser (R150)

如果进一步增大泵浦功率,稳定的单脉冲输出将转变为双脉冲输出,如图11所示。其输出光谱如图12所示。当泵浦功率为81 W时可以观察到稳定的双脉冲输出,重复频率变为2倍,输出功率为14.24 W。从可饱和吸收的角度看,腔内损耗随脉冲能量的增大而减小,所以单脉冲运转总是比双脉冲更有利,但当能量远高于饱和能量时,由于腔内损耗已逼近极小值,这一优势并不显著;而由于单脉冲输出的能量是双脉冲的2倍,其较强的自相位调制效应带来了较大的光谱展宽,当输出光谱宽度接近Yb:YAG增益介质在1030 nm处的发射峰

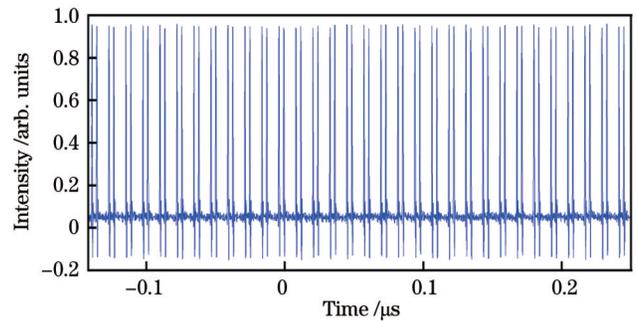


图11 Yb:YAG薄片激光器(R150)输出的双脉冲序列

Fig. 11 Output double pulse train of Yb:YAG thin disk laser (R150)

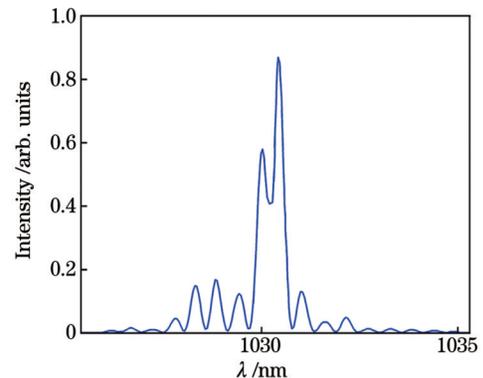


图12 Yb:YAG薄片激光器(R150)输出的双脉冲光谱

Fig. 12 Output double pulse spectrum of Yb:YAG thin disk laser (R150)

宽度时,频域能量损失的影响更加显著^[23]。所以当输出功率过大时,克尔透镜锁模将转为双脉冲输出。

为了避免双脉冲输出的情况并进一步提高输出功率,应增大克尔介质处的光斑尺寸,降低克尔介质处的功率密度。故改换聚焦镜FM1和FM2的RoC为200 mm(后文简记为R200)。当泵浦功率设置为94 W时,可以获得平均功率为22.33 W、重复频率为79.36 MHz的飞秒脉冲输出,光光效率为24%,对应的单脉冲能量为0.28 μJ。其自相关曲线如图13所示,双

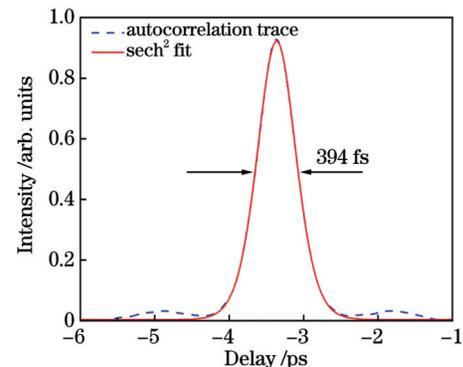


图13 Yb:YAG薄片激光器(R200)锁模输出的飞秒脉冲的强度自相关曲线和双曲正割拟合结果

Fig. 13 Intensity autocorrelation curve and sech^2 fitting result of mode-locked output femtosecond pulse of Yb:YAG thin disk laser (R200)

曲正割拟合得到的脉冲宽度为 394 fs。同时脉冲输出的光谱如图 14 所示。

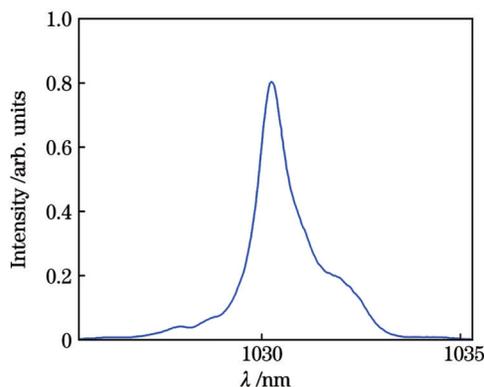


图 14 Yb:YAG 薄片激光器(R200)锁模输出的光谱

Fig. 14 Mode-locked output optical spectrum of Yb:YAG thin disk laser (R200)

5 结 论

分析了基于 72 通泵浦的薄片克尔锁模激光器的原理及谐振腔的设计,基于 ABCD 矩阵和孤子锁模理论总结了谐振腔的设计原则。搭建了基于薄片的 KLM 飞秒激光实验装置。当泵浦功率为 72 W 时,获得了平均功率为 11.78 W、脉冲宽度为 245 fs、重复频率为 81.45 MHz 的飞秒脉冲输出,输出结果与设计目标非常接近。将聚焦凹面镜对的曲率半径改为 200 mm,得到了平均功率为 22.33 W、脉冲宽度为 393 fs、重复频率为 79.36 MHz、单脉冲能量为 0.28 μ J 的输出。为进一步提升输出功率,接下来将进一步增大聚焦凹面镜对的曲率半径,优化二阶色散补偿量,同时将谐振腔置于低真空密闭环境中以减小空气扰动和空气色散的影响。

参 考 文 献

[1] Meyer F, Vogel T, Ahmed S, et al. Single-cycle, MHz repetition rate THz source with 66 mW of average power[J]. Optics Letters, 2020, 45(9): 2494-2497.

[2] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.

[3] Emaury F, Diebold A, Saraceno C J, et al. Compact extreme ultraviolet source at megahertz pulse repetition rate with a low-noise ultrafast thin-disk laser oscillator[J]. Optica, 2015, 2(11): 980-984.

[4] Liu X Q, Chen Q D, Guan K M, et al. Dry-etching-assisted femtosecond laser machining[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(3): 1600115.

[5] Morin F, Druon F, Hanna M, et al. Microjoule femtosecond fiber laser at 1.6 μ m for corneal surgery applications[J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 1991-1993.

[6] 柳阳雨, 曹雪, 鲜安华, 等. 1 μ m 周期量级超快激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100003.

Liu Y Y, Cao X, Xian A H, et al. Research progress of 1 μ m band period ultrafast laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100003.

[7] Tian W L, Xu R, Zheng L, et al. 10-W-scale Kerr-lens mode-locked Yb: CALYO laser with sub-100-fs pulses[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1297-1300.

[8] Kim J, Song Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465-540.

[9] 董自凯, 宋晏蓉. 光纤激光器被动锁模技术研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501006.

Dong Z K, Song Y R. Research progress of mode-locked fiber lasers based on saturable absorbers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501006.

[10] Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 365-372.

[11] 郝婧婕, 刘贺言, 陈红山, 等. 克尔透镜锁模碟片激光振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1201002.

Hao J J, Liu H Y, Chen H S, et al. Progress in Kerr-lens mode-locked thin disk laser oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1201002.

[12] Aus der Au J, Spühler G J, Südmeyer T, et al. 16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser [J]. Optics Letters, 2000, 25(11): 859-861.

[13] Saltarelli F, Graumann I J, Lang L, et al. Power scaling of ultrafast oscillators: 350-W average-power sub-picosecond thin-disk laser[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31465-31474.

[14] Pronin O, Brons J, Grasse C, et al. High-power 200 fs Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator[J]. Optics Letters, 2011, 36(24): 4746-4748.

[15] Brons J, Pervak V, Fedulova E, et al. Energy scaling of Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillators[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6442-6445.

[16] Fischer J, Drs J, Modsching N, et al. Efficient 100-MW, 100-W, 50-fs-class Yb:YAG thin-disk laser oscillator[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 42075-42081.

[17] Peng Y N, Zhang J W, Wang Z H, et al. Generation of 15 W femtosecond laser pulse from a Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 094207.

[18] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.

[19] Paschotta R, Keller U. Passive mode locking with slow saturable absorbers[J]. Applied Physics B, 2001, 73(7): 653-662.

[20] Dai L H, Liu R, Li X, et al. High-efficiency, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched Yb:YAG thin-disk laser based on a 72-pass pump module[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19629-19638.

[21] 刘锐, 公发全, 李想, 等. 全固态碟片激光器的多孔泡沫热沉传热特性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0414002.

Liu R, Gong F Q, Li X, et al. Research on heat transfer characteristics of porous foam heat sink for all solid state thin disk lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0414002.

[22] 戴隆辉, 刘锐, 公发全, 等. 高平均功率腔倒空纳秒薄片激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1301002.

Dai L H, Liu R, Gong F Q, et al. Cavity-dumped nanosecond thin-disk laser with high average power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1301001.

[23] Kalashnikov V L, Sorokin E, Sorokina I T. Multipulse operation and limits of the Kerr-lens mode locking stability[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(2): 323-36.

72-Pass Pumped Kerr Lens Mode-Locked Yb:YAG Thin-disk Laser

Lei Xiyin^{1,2}, Liu Rui¹, Li Hui³, Li Xiang¹, Dai Longhui^{1,2}, Gong Faquan¹, Deng Songwen¹,
Lü Qipeng¹, Jia Yong¹, Sun Tianxiang¹, Wang Feng¹, Li Gang^{1*}

¹Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023,
Liaoning, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract

Objective High-power femtosecond lasers are widely utilized in various research fields such as terahertz (THz) generation, frequency comb, and high harmonic generation because of their short pulsed width, high peak frequency, and good beam quality. However, owing to strong thermal lens effect, the output power of lasers based on traditional bulk-shaped gain medium is limited to the 20 W level. Further, fiber lasers are restricted by nonlinear effects such as stimulated Brillouin scattering at high output power. The emergence of thin disk lasers (TDL) has facilitated the simultaneous solving of these two problems. A thickness of only a few hundreds of micrometers combined with effective back-side cooling technique can significantly reduce the influence of thermal lens effect and nonlinear effects. In addition, multiple pass pump module guarantees high absorption efficiency under the condition that the gain medium is extremely thin. Currently, femtosecond lasers based on thin disk medium are mainly achieved using the semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) mode-locking and Kerr Lens mode-locking (KLM). The highest output power obtained using the former (350 W) is higher than that of KLM (270 W); however, KLM lasers exhibit better performance in the aspect of pulse width, peak power, cost, and stability of key components. Thus, KLM TDL is a promising candidate for light sources in high field science and nonlinear optical researches.

Methods We investigate KLM thin disk lasers by using our home-made 72-pass pump module. First, we analyze the principles of Kerr lens mode-locking in thin disk lasers to ensure that the mode radius at the pinhole decreases at a proper ration following the insertion of the Kerr medium, or the virtual Kerr Lens at the beam waist. Subsequently, we demonstrate the cavity design method based on ABCD matrix and soliton mode-locking theory. On the basis of this method, we design the KLM TDL cavity by employing a focusing mirror pair with the radius of curvature (RoC) of 150 mm. In addition, we simulate the mode radius in the cavity under continuous wave (CW) and KLM operation with an iteration algorithm. Finally, a KLM TDL experiment is conducted based on a 72-pass pump module. Moreover, the cavity is optimized based on the former experiment, and the higher output power is achieved.

Results and Discussions The experiment conducted with the first cavity structure yields a femtosecond output of 11.78 W at fundamental transverse mode when pumped at 72 W. The pulse train with a frequency of 81.45 MHz measured via an oscilloscope shows good stability in the time scale of 2 μ s (Fig. 8). The pulse width measured using an autocorrelator to be 243 fs, assuming sech² pulse shape, is shown in Fig. 9. Further, the spectral width is measured to be 4.6 nm (Fig. 10). The multiple peaks in the spectrum may be caused by the uneven group delay dispersion (GDD) curve of the home-made dispersive mirrors in the wavelength range of 1025–1035 nm. The corresponding time-bandwidth product is 0.317, which is slightly larger than the theoretic minimum value. On further increasing the pump power to 81 W, stable double pulse output can be observed (Fig. 11). This phenomenon is attributed to the strong spectral broadening effect under high power single pulse operation. If the output mode transforms into double pulse operation, the narrowed spectrum fits better into the emission spectrum of Yb : YAG.

Following the optimization of the cavity structure by increasing the RoC of the focusing lens pair to 200 mm, the output power is increased to 22.33 W at the pump power of 94 W with an optical-to-optical efficiency of 24%. However, the repetition frequency remains almost unchanged at 79.36 MHz and the pulse energy is 0.28 μ J. The corresponding pulse width is measured to be 393 fs (Fig. 13).

Conclusions We analyze the principles of Kerr lens mode-locked thin disk lasers based on a 72-pass pump module and the design of the KLM cavity. The design principles are examined according to the ABCD matrix method and soliton mode-locking theory. Finally, the KLM laser oscillator based on thin disk medium is constructed. The stable femtosecond pulse output at 11.78 W with the pulse width of 245 fs and repetition rate of 81.45 MHz is obtained when pumped at 72 W. The output result is nearly identical to the designed target. After changing the RoC of the focusing mirror pair to 200 mm, the output power is increased to 22.33 W at the pump power of 94 W with the corresponding pulse width of 393 fs. In future studies, to increase the output power to a higher level, the RoC of focusing mirrors will be increased, and the optimized dispersion compensation will be provided. In addition, the cavity will be placed in a vacuum environment to reduce the influence of air disturbance and air dispersion.

Key words lasers; thin disk lasers; multi-pass pump; Kerr lens mode-locking; femtosecond laser